

OXYGÉNATION ET RECIRCULATION CHEZ LA TOMATE DE SERRE BIOLOGIQUE

Steeve Pepin¹, Martine Dorais², Valérie Gravel², Claudine Ménard² et Jacques Thériault³

Durée : 03/2009 – 04/2011

FAITS SAILLANTS

Ce projet visait à optimiser, à l'aide de l'irrigation et d'un apport en oxygène, le développement d'une culture de tomate biologique en serre dans un système de production en bacs utilisant différents sols. Le système de culture utilisé était composé de bacs de culture (1 m^3) en recirculation. L'oxygénation, dans certains types de sol, augmente la disponibilité en NO_3^- dans la solution du sol. Toutefois, aucun effet définitif n'a pu être observé sur les rendements en fruits. Pour l'ensemble des sols testés, une augmentation de la respiration résultant de l'oxygénation a pu être observée. L'oxygénation a donc eu un effet bénéfique sur l'activité biologique des sols. De plus, l'apport en oxygène au niveau du sol semble avoir un effet bénéfique sur le contenu en lycopène des fruits.

OBJECTIF(S) ET MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce projet visait à déterminer l'effet de l'utilisation de la recirculation des effluents couplée à une irrigation ciblée au niveau des racines (2009) et de l'oxygénation du sol (2010–2011) sur la croissance et le rendement d'une production de tomate en sol sous régie de culture biologique. Ce projet a été effectué aux Serres Haute Performance de l'Université Laval (Québec). Six types de sol ont été étudiés sous une régie de production biologique: sol sableux, sol biologique reconstitué contenant 60% de bran de scie, 30% de tourbe et 10% de compost, sol biologique reconstitué contenant 90% tourbe blonde et 10% compost, loam sablonneux, loam et terre noire. L'apport de fertilisants s'est fait en alternance sous forme de compost Biosol marin (Fafard Itée), de farine de crevettes (Distrival Itée), d'algue Acadie en poudre soluble (Distrival Itée) ou en granulé (Distrival Itée) ainsi que d'engrais à base de fumier de poule (Acti-sol ®). Les sols ont été oxygénés durant les deux derniers mois de la période de culture 2010. Le rendement en fruits, les flux de CO_2 émis à la surface du sol, en tant qu'indicateur de l'activité biologique du sol, et le contenu en anions dans la solution du sol ont été mesurés.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR L'INDUSTRIE

Une irrigation ciblée au niveau des racines a eu peu d'impact sur le rendement en fruits, contrairement au type de sol utilisé (Figure 1). Une conclusion définitive quant à l'effet de l'oxygénation sur le rendement est difficile à émettre étant donné la courte période de récolte. Toutefois, lors de l'évaluation de la qualité des fruits au mois de février 2011, les fruits provenant des sols oxygénés contenaient significativement plus de lycopène (68,3 mg/kg) comparativement aux fruits provenant des sols non oxygénés (64,7 mg/kg) ($P=0,0172$).

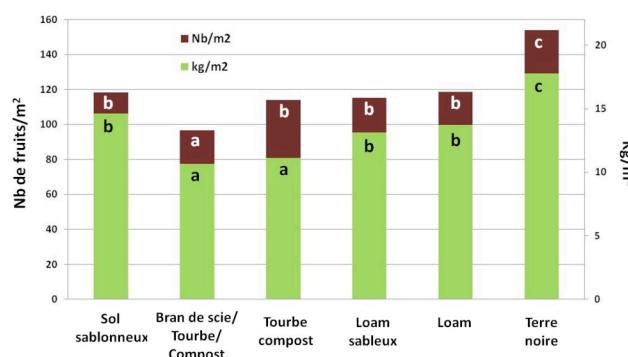


Figure 1. Rendement total en fruits obtenu pour les six sols testés lors de la culture 2009.

¹ Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, QC

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Pav. Envirotron, Université Laval, QC

³ Club Savoir-Serre

Deux prises de mesure des flux de CO₂ ont été effectuées suite à la mise en place du système d’oxygénéation (février et mars 2011). Dans les deux cas, des taux de respiration du sol significativement plus élevés ont été mesurés dans les sols oxygénés comparativement aux sols non-oxygénés (Figure 2). L’apport en O₂ semble ainsi augmenter l’activité biologique dans les sols.

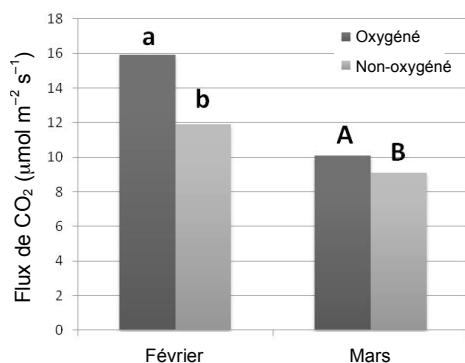


Figure 2. Émission de CO₂ à la surface des sols soumis à une oxygénéation.

L’oxygénéation a considérablement augmenté la disponibilité en NO₃⁻ dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost ainsi que dans le loam (Tableau 1). Cet effet n’était toutefois pas observé dans les autres sols.

Tableau 1. Augmentation de la concentration en NO₃⁻ dans la solution du sol échantillonnée à l'aide de lysimètres suite à la mise en fonction du système d'oxygénéation.

	Augmentation (x-fois)	
	NO ₃ ⁻	
Bran de scie, tourbe, compost/oxygéné	71,0 ± 5,4	
	non oxygéné	20,5 ± nd
Loam/oxygéné	67,0 ± 2,8	
	non oxygéné	5,5 ± 0,1

nd : non déterminé

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L’INDUSTRIE

Ce projet a permis de démontrer les bienfaits d’un apport en oxygène afin d’optimiser un système de production plus durable pour la culture de la tomate biologique en serre. L’oxygénéation du sol semble avoir un effet bénéfique sur l’activité biologique et sur la disponibilité en NO₃⁻ dans un système en recirculation, et donc plus respectueux de l’environnement, ce qui pourrait faciliter la régie de fertilisation dans un tel système.

POINT DE CONTACT

Steeve Pepin, responsable du projet
Tél. : (418) 656–2131, poste 16238
Courriel : steeve.pepin@fsaa.ulaval.ca

Martine Dorais, co-responsable du projet
Tél. : (418) 656–2131, poste 3939
Courriel : martine.dorais@agr.gc.ca

PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière du ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation, dans le cadre du Programme de soutien au développement de l’agriculture biologique (PSDAB). L’équipe de recherche tient à remercier les Industries Harnois, Serres Jardins-Nature, Jardins Naturlutte et la ferme biologique André Carrier pour leur soutien technique, notamment dans la régie de leur sol biologique respectif.



Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Rapport final

Réduction des émissions de fertilisants dans l'environnement et accroissement de la vitesse des échanges d'éléments nutritifs par une régie optimale d'irrigation de la tomate de serre biologique

Numéro du projet
08-BIO-31

Nom de l'organisme requérant
Steeve Pepin, Université Laval
Martine Dorais, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Valérie Gravel, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Date de la fin du projet
29 avril 2011

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux	4
Introduction	5
Description du projet	5
Saison de production 2009.....	5
Saison de production 2010.....	6
Déroulement des travaux.....	6
Site expérimental.....	6
Conditions de culture	8
Fertilisation et recirculation des effluents	8
Mesures des paramètres du sol.....	8
Mesures de croissance de plants et qualité des fruits.....	9
Analyses statistiques	9
Résultats obtenus et discussion.....	9
Lessivage et irrigation	9
Concentration d'anions dans la solution du sol.....	14
Flux de CO ₂ à la surface du sol.....	15
Rendement en fruits.....	18
Qualité des fruits	22
Biomasse destructive.....	25
Discussion et biens livrés	28
Difficultés rencontrées	29
Annexe 1.....	31
Annexe 2.....	32

Liste des figures

Figure 1. Dispositif expérimental utilisé lors de la première année du projet qui visait à tester six sols différents et deux systèmes d'irrigation (2009).....	7
Figure 2. Dispositif expérimental utilisé lors de la deuxième année du projet qui visait à tester six sols différents et l'oxygénation des sols (2010).	7
Figure 3. Conductivité électrique (CE) et pH du lessivage (a et c, respectivement) et de l'eau d'irrigation (b et d, respectivement) des six sols testés (moyennes).....	11
Figure 4. Mesure de pH de solution drainée (a) et de la solution recirculée pour l'arrosage de la culture (b). Le pH a été mesuré sur un mélange des solutions drainées de six bacs contenant un même sol.....	12
Figure 5. Conductivité électrique (CE) de solution drainée (a) et de la solution recirculée pour l'arrosage de la culture (b). La CE a été mesurée sur un mélange des solutions drainées de six bacs contenant un même sol.....	13
Figure 6. Rendement total en fruits obtenu pour les six sols testés lors de la culture 2009.....	18
Figure 7. Rendement cumulatif en fruits total (a) et en fruits no 1 (b) pour les six sols testés lors de la période de production 2010.....	19
Figure 8. Contenu en lycopène (a), capacité antioxidant (b), pourcentage de matière sèche (c) et sucres solubles (d) des fruits lors de l'échantillonnage en décembre 2009.	22
Figure 9. Contenu en lycopène, capacité antioxidant et acidité titrable des fruits lors de cinq échantillonnages au cours de la culture 2010.....	24
Figure 10. Effet du type d'irrigation et du sol sur la biomasse des tiges des plants de tomate lors de la période de culture 2009.....	25
Figure 11. Effet du type d'irrigation et du sol sur la biomasse des feuilles des plants de tomate lors de la période de culture 2009.....	26
Figure 12. Effet de l'oxygénation et du type sol sur la biomasse des feuilles et de la tige des plants de tomate lors de la période de culture 2010.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1. Augmentation de la concentration en anions dans la solution du sol échantillonnée à l'aide de lysimètres jusqu'à la mise en fonction du système d'oxygénéation.	14
Tableau 2. Augmentation de la concentration en anions dans la solution du sol échantillonnée à l'aide de lysimètres suite à la mise en fonction du système d'oxygénéation.	14
Tableau 3. Émission de CO ₂ à la surface du sol au cours de la période de production 2009.	16
Tableau 4. Émission de CO ₂ à la surface du sol au cours de la période de production 2010.	17
Tableau 5. Rendement cumulatif en tomates jusqu'à la mise en place du système d'oxygénéation pour la culture 2010.	20
Tableau 6. Rendement cumulatif en tomates pour la période où le système d'oxygénéation était fonctionnel (16 décembre 2010 au 7 mars 2011).	21
Tableau 7. Rendement cumulatif en tomates pour l'ensemble de la culture 2010 et incluant les mois où le système d'oxygénéation était fonctionnel (du 11 mai 2010 au 7 mars 2011).	21

Introduction

En dépit de l'importance primordiale du sol en termes de contenu en eau et éléments nutritifs, très peu d'information et d'outils de gestion de l'eau et de la fertilisation sont actuellement disponibles pour les producteurs biologiques. Une relation négative entre le contenu en eau du sol et l'activité biologique du sol, exprimée en flux de CO₂, sous des conditions commerciales d'irrigation basée sur la radiation solaire a déjà été démontrée. Une zone optimale de confort hydrique basée sur les paramètres physiologiques de la plante et l'activité biologique du sol a donc été définie pour un loam (Serres Jardin Nature, New Richmond). Pour ce type de sol, un seuil d'irrigation de -100 mbar par rapport à -40 mbar a favorisé la croissance des plantes, tout en réduisant de 46% le volume d'eau utilisé. Il était donc primordial de poursuivre ces travaux sur différents types de sol afin de fournir des recommandations précises pouvant être adoptées par l'ensemble des producteurs biologiques en serre.

L'objectif de ce projet visait à déterminer l'effet de l'utilisation de la recirculation des effluents couplée à une irrigation ciblée et de l'oxygénation du sol sur une production de tomate en sol sous régie de culture biologique. De plus, ce projet visait également à démontrer que la réduction des émissions de charges fertilisantes dans l'environnement est possible sous de telles conditions. Les travaux avaient pour but de vérifier les hypothèses suivantes : (i) une irrigation ciblée au niveau des racines (à 15 cm de la surface) optimise la régie d'irrigation selon les besoins de la plante, ce qui améliore l'efficacité des échanges d'éléments nutritifs; et dans un deuxième temps (ii) qu'une oxygénation du sol améliore la croissance et le rendement des plants de tomate sous régie de culture biologique.

Description du projet

Saison de production 2009

Au cours de cette première année, six types de sol certifié biologique ont été étudiés sous une régie de production biologique basée sur une fertilisation solide :

- 1) sol sableux (sol d'une ferme biologique non cultivé)
- 2) sol biologique reconstitué contenant 60% de bran de scie, 30% de tourbe et 10% de compost
- 3) sol biologique reconstitué contenant 90% tourbe blonde et 10% compost.
- 4) loam sablonneux (sol des Serres Jardins-Nature)
- 5) loam (sol provenant des Jardins Naturlutte)
- 6) terre noire biologique de la région de Joliette (Les Industries Harnois)

Deux systèmes d'irrigation ont été testés : i) irrigation entièrement à la surface ou ii) irrigation où 1/3 du volume d'eau est fourni en surface et 2/3 à 15 cm de profondeur. L'irrigation s'est faite à l'aide de microgoutteurs placés en surface ou enterrés à 15 cm de profondeur. Le cultivar utilisé était Clarence (var. grappe) greffé sur Beaufort. Dix jours avant la plantation, un premier apport de 35 L/m³ de compost Biosol marin (2-1-1; Fafard Itée) a été effectué. Le compost a par la suite été incorporé au premier 25 cm de sol. La plantation des plants de tomate dans les bacs (10 plants/bac) a été effectuée le 25 mai 2009. La recirculation des eaux de lessivage a débuté le 4 juin 2009. La fin des récoltes a eu lieu le 18 décembre 2009.

Saison de production 2010

Pour cette deuxième année du projet, les mêmes six sols utilisés lors de la première saison de culture ont été utilisés pour poursuivre les travaux. Suite à la fin de la production de 2009, un engrais vert (seigle d'automne) a été semé le 12 janvier 2010. Le 16 février 2010, la partie aérienne a été coupée et après 3 jours, elle a été incorporée au 10 premier cm de sol. Le cultivar utilisé était Trust (var. beef) greffé sur Beaufort. Une semaine après l'incorporation de l'engrais vert, une première fertilisation de base a été appliquée. Celle-ci consistait en 17,5 L/ m³ de compost Biosol marin (2-1-1; Fafard Itée) et de 1 L/ m³ de farine de crevette (8,5-6-1,2; Distrival Itée). Pour cette deuxième année de production, un seul système d'irrigation a été utilisé. Les plants étaient arrosés par aspersion à l'aide de brumisateurs à la surface du sol. La plantation des plants de tomate dans les bacs (10 plants/bac) a été effectuée le 1 mars 2010. Le système d'oxygénéation du sol a été mis en fonction de façon permanente pour les 11 dernières semaines de culture (mi-décembre à la mi-mars). La fin des récoltes a eu lieu le 9 mars 2011.

Déroulement des travaux

Site expérimental

Ce projet a été effectué dans un compartiment de 150 m² du complexe de Serres Haute Performance situé à l'Université Laval (Québec, QC). Pour les besoins du projet, 36 bacs de culture de 1 m³ chacun ont été disposés en 3 rangs. Les deux rangs de chaque côté de la serre ont été utilisés comme rangs de garde afin d'éviter les effets de bordure. En début de culture, 10 transplants de tomate ont été plantés dans chacun des bacs. Le dispositif expérimental était un plan en tiroir avec 3 répétitions. Lors de la première année de production (2009), les parcelles principales représentaient les deux systèmes d'irrigation et les sous-parcelles représentaient les six sols (figure 1). Lors de la deuxième année de production (2010), les parcelles principales représentaient le traitement oxygénéation et les sous-parcelles représentaient les six sols (figure 2). Un bac de culture représentait une unité expérimentale.

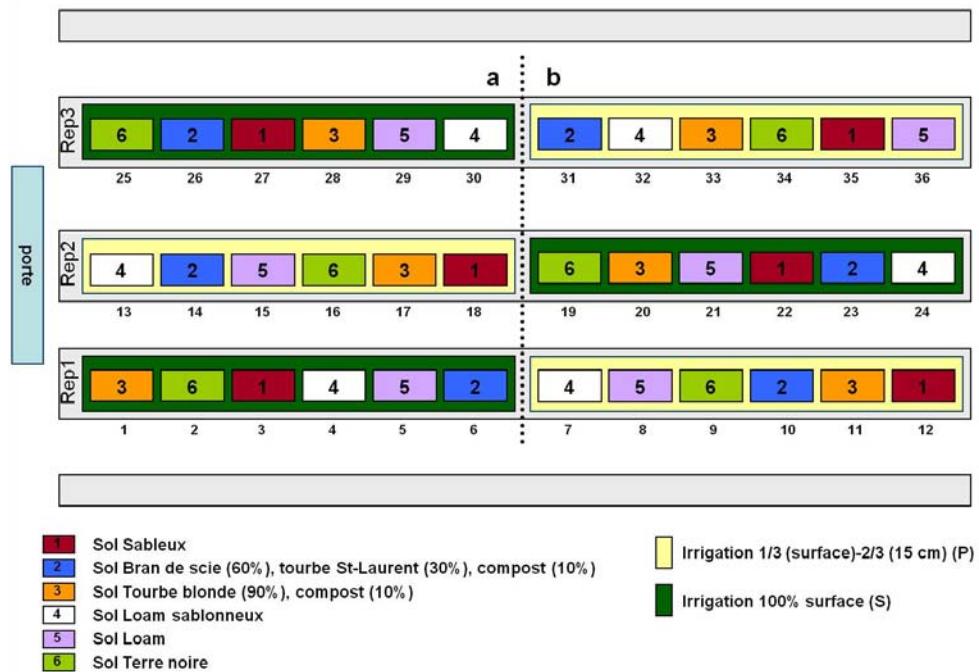


Figure 1. Dispositif expérimental utilisé lors de la première année du projet qui visait à tester six sols différents et deux systèmes d'irrigation (2009).

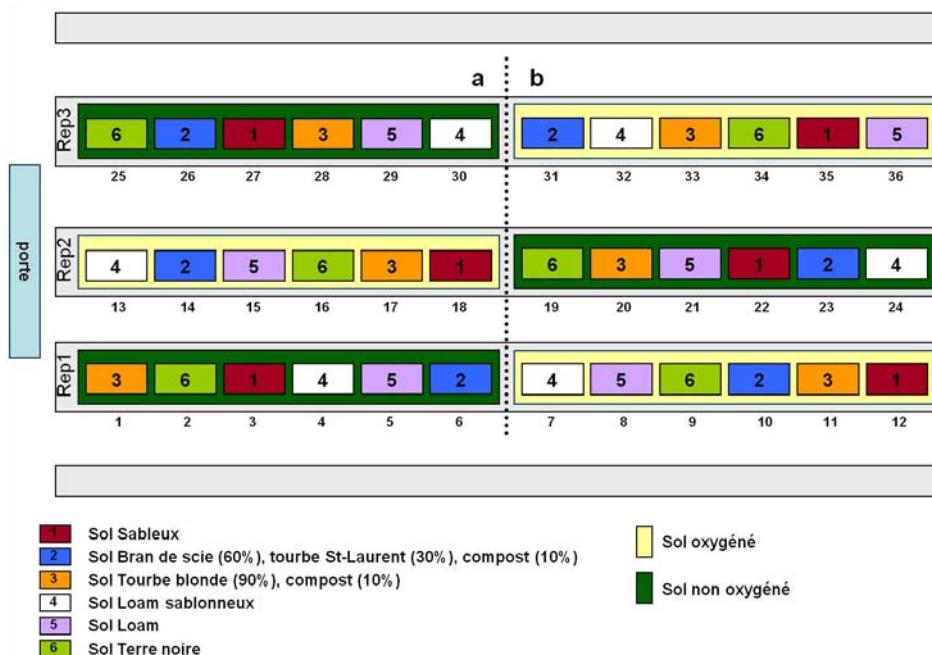


Figure 2. Dispositif expérimental utilisé lors de la deuxième année du projet qui visait à tester six sols différents et l'oxygénation des sols (2010).

Conditions de culture

Tout au long des deux cycles de production, les conditions climatiques ont été contrôlées à l'aide d'un système Priva, selon le stade de croissance des plantes ainsi que les conditions extérieures afin de suivre une gestion similaire à celle mise en place chez des producteurs de tomates. Aucun enrichissement en CO₂ n'a été effectué durant les 2 ans qu'a duré le projet. De façon générale, la température de jour était maintenue à 22°C et la température de nuit était maintenue à 18°C. L'humidité relative était maintenue à 60-70%. Une régie de culture standard a été mise en place tout au long de la saison de croissance. Les plants de tomate ont donc été tuteurés, taillés et effeuillés de façon hebdomadaire. Les grappes ont été taillées à 4 ou 5 fruits, selon le stade de développement. La pollinisation s'est fait à l'aide de bourdons. L'irrigation des plants a été contrôlée à l'aide de 3 tensiomètres insérés à 15 cm de profondeur pour chacun des sols (installés dans 3 bacs de culture distincts). Les valeurs de potentiel matriciel ainsi mesurées et enregistrées étaient gérées par le système Priva. Le seuil de démarrage était de -30 à -50 mbars, selon le type de sol.

Fertilisation et recirculation des effluents

Suite à la plantation, une régie de fertilisation a été mise en place afin de répondre aux besoins de la culture. L'apport de fertilisants s'est fait en alternance sous forme de compost Biosol marin (2-1-1; Fafard Itée), de farine de crevette (8,5-6-1,2; Distrival Itée), d'algue Acadie en poudre soluble (0,5-0,2-17; Distrival Itée) ou en granulé (0,5-0,1-1,5; Distrival Itée) ainsi que l'engrais à base de fumier de poule Acti-sol (4-6-8; Acti-sol ®). Bien que les apports aient été faits de façon systématique hebdomadairement, le choix du type d'engrais était fait de façon à garder, le plus possible, une conductivité électrique (CE) constante dans les eaux de lessivage et dans l'eau d'irrigation. Le système de culture était en recirculation. Les eaux de lessivage de chacun des 6 sols testés étaient recueillies séparément. Toutefois, pour un même sol et afin de simplifier le système, les effluents des parcelles irriguées en surface ou en profondeur (première année) et des parcelles oxygénées ou non (deuxième année) ont été mélangés. Ces effluents étaient par la suite dilués avec de l'eau et la solution ainsi formée était par la suite utilisée pour l'irrigation de la culture. Le pH et la CE des eaux de lessivage et des eaux d'irrigation ont été mesurés quotidiennement.

Mesures des paramètres du sol

Hebdomadairement, des échantillons de solution du sol ont été prélevés à l'aide de lysimètres installés à 15 cm de profondeur. Un lysimètre était installé par unité expérimentale. L'analyse du contenu en anions (NO₃, PO₄, SO₄ et Cl) de la solution du sol a été fait à l'aide d'un analyseur chromatographique d'ions ICS-2100 et ICS-1100 (Dionex Canada Ltd, Oakville, ON). L'analyse des cations est présentement en cours. De plus, les flux de CO₂ émis à la surface du sol ont été mesurés à 4 reprises lors de la première année du projet et à tous les mois lors de la deuxième année. Les mesures ont été prises à l'aide d'un système portatif de mesure d'échange gazeux LI-6400 (Li-Cor, Lincoln, NE, É.-U.) muni d'une chambre de sol 6400-09 (Li-Cor). Une mesure a été effectuée par unité expérimentale.

Mesures de croissance de plants et qualité des fruits

Des mesures de croissance non destructives hebdomadaires ont été prises au cours des deux saisons de production selon la méthode Tom-Pousse. Deux (première année) et un plant (deuxième année) ont été choisis aléatoirement par unité expérimentale. Les paramètres mesurés étaient la croissance hebdomadaire de la tige, la longueur de la 5^e feuille, la hauteur de la dernière grappe en fleurs, la longueur de la dernière grappe nouée, le nombre de feuilles, de fleurs et de fruits. Ces paramètres ont également permis de calculer la vitesse de nouaison des fruits. Ces données ont été utilisées afin d'ajuster les paramètres climatiques et de fertilisation dans la serre. Des mesures de croissance destructives ont également été faites à deux reprises lors de la culture 2009 et à cinq reprises lors de la culture 2010. Les paramètres mesurés incluaient la surface foliaire totale, la masse fraîche et sèche des feuilles, la longueur de la tige ainsi que la masse fraîche et sèche de la tige. Chacun des échantillons de feuilles et de tige a été séché à 65°C, puis broyé pour ensuite procéder à l'analyse minérale (N, Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Zn). Ces analyses sont présentement en cours.

Le rendement en fruits a été mesuré une ou deux fois par semaine, selon le stade de culture. À chaque récolte, un classement des fruits a été effectué afin d'en évaluer la qualité externe. Pour chacune des classes, le nombre et le poids total des fruits ont été mesurés pour chaque unité expérimentale. À la fin de la culture 2009 et à 5 reprises durant la culture 2010, cinq fruits ont été récoltés par unité expérimentale afin d'en évaluer la qualité gustative et nutritive. La conductivité électrique, les acides titrables, les antioxydants totaux solubles, les lycopènes, le pH, les sucres solubles ainsi que le pourcentage de matière sèche ont été mesurés.

Analyses statistiques

Pour les deux années du projet, les traitements ont été comparés en utilisant une analyse de variance pour un modèle linéaire à effets mixtes (procédure MIXED du logiciel SAS et un seuil significatif $\alpha \leq 0,05$). Lors de la première année, l'effet des blocs (répétitions) a été considéré comme un effet aléatoire et l'effet des traitements (sol et irrigation) comme un effet fixe. Lors de la deuxième année, l'effet des blocs (répétitions) a une fois de plus été considéré comme un effet aléatoire et l'effet des traitements (sol et oxygénation) comme un effet fixe.

Résultats obtenus et discussion

Lessivage et irrigation

Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés à partir du mélange des solutions drainées de chaque sol séparément. Pour se faire, le lessivage de six bacs contenant un même sol était mélangé avant d'être ensuite recirculé lors de l'arrosage de la culture. Au cours de la culture 2009, la CE des eaux de lessivage était entre 2,4 et 3,7 mS cm⁻¹ en début de culture (fig. 3a). Celle-ci a diminué graduellement au cours des mois suivants pour se stabiliser à des valeurs allant de 0,5 à 1,0 mS cm⁻¹ (fig. 3a). Le pH des eaux de lessivage et de l'eau d'irrigation est resté relativement stable au cours de la période de culture (fig. 3c, d).

Tout au long de la culture 2010, le pH des eaux de lessivage est demeuré relativement constant avec des moyennes sur l'ensemble de la culture entre 7,2 (sol sableux) et 7,8 (loam sablonneux) (fig. 4a). Une tendance similaire a également été observée pour la solution d'arrosage recirculée avec des moyennes entre 7,5 (sol sableux ou terre noire) et 7,8 (loam sablonneux ou mélange

tourbe blonde et compost) (fig. 4b). Suite à l'application initiale de fertilisants avant la plantation, la conductivité électrique de la solution drainée a diminué pour l'ensemble des sols sur une période d'environ deux mois (mars à mai) pour ensuite augmenter graduellement au cours des quatre mois suivants (juin à septembre) (fig. 5a).

À partir du mois de septembre 2010 jusqu'à la fin de la culture (mars 2011), une plus grande variabilité a été observée au niveau des valeurs de CE des eaux de lessivage et de la solution d'irrigation comparativement aux valeurs observées durant les mois de printemps et d'été (fig. 5a, b). Un des facteurs expliquant ceci est la fréquence d'irrigation qui est grandement diminuée au cours des mois d'automne et d'hiver. La fréquence d'application des engrains solides a de plus été ajustée afin de suivre le niveau de croissance des plants de tomate, ceux-ci prélevant moins d'eau et d'éléments minéraux durant la période hivernale.

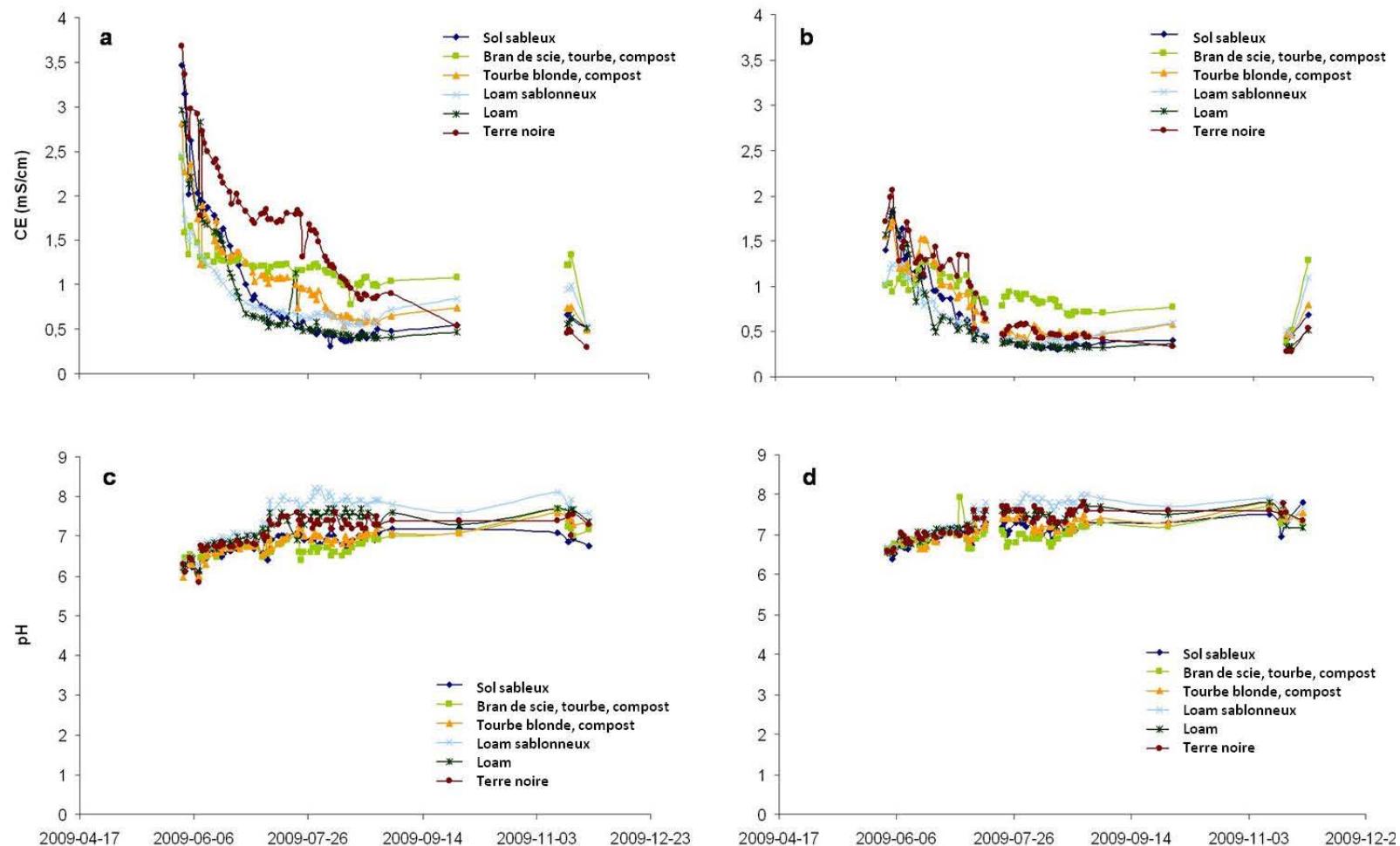


Figure 3. Conductivité électrique (CE) et pH du lessivage (a et c, respectivement) et de l'eau d'irrigation (b et d, respectivement) des six sols testés (moyennes) lors de la culture 2009.

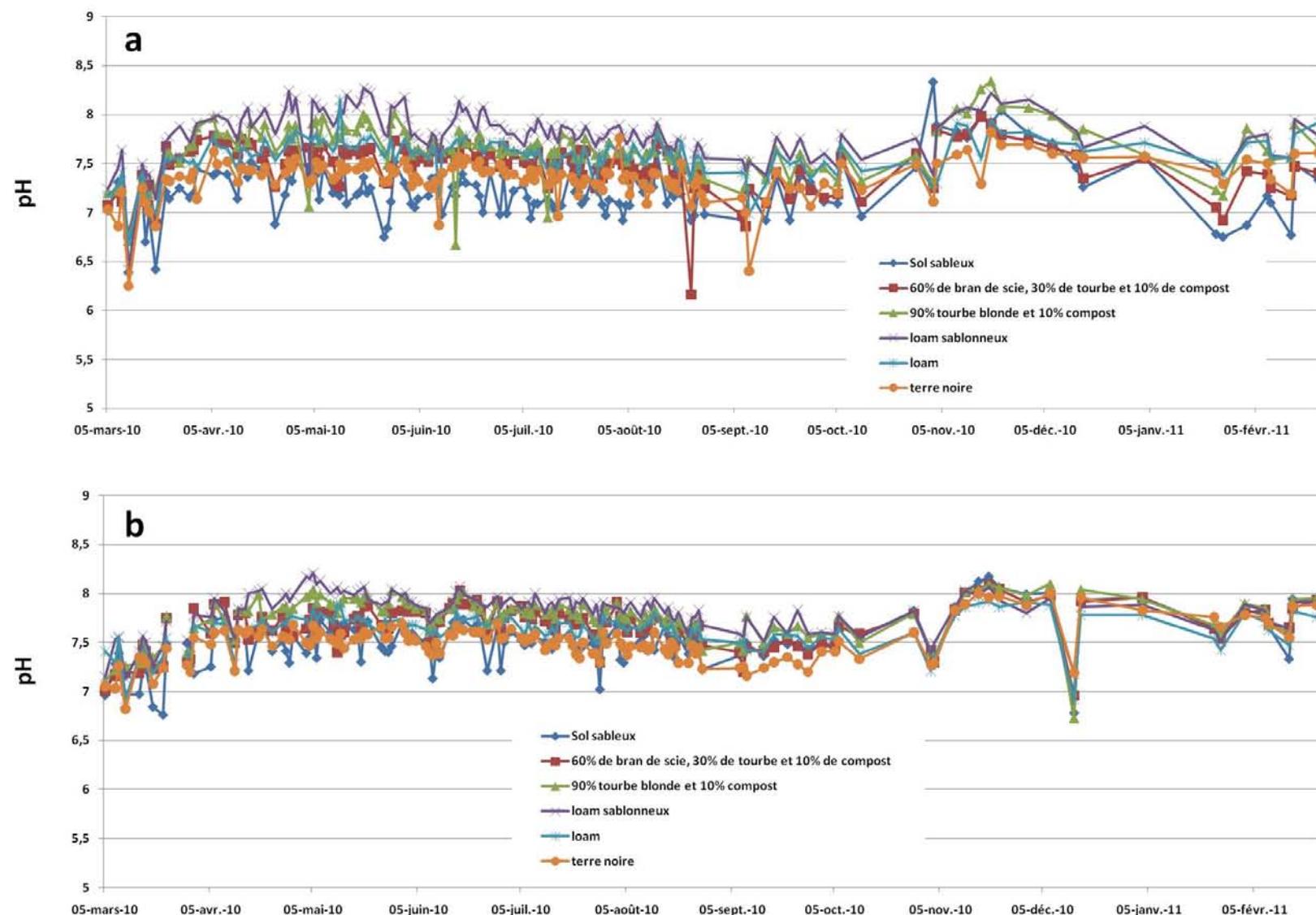


Figure 4. Mesure de pH de la solution drainée (a) et de la solution recirculée pour l’arrosage de la culture (b) au cours de la production 2010. Le pH a été mesuré sur un mélange des solutions drainées de six bacs contenant un même sol.

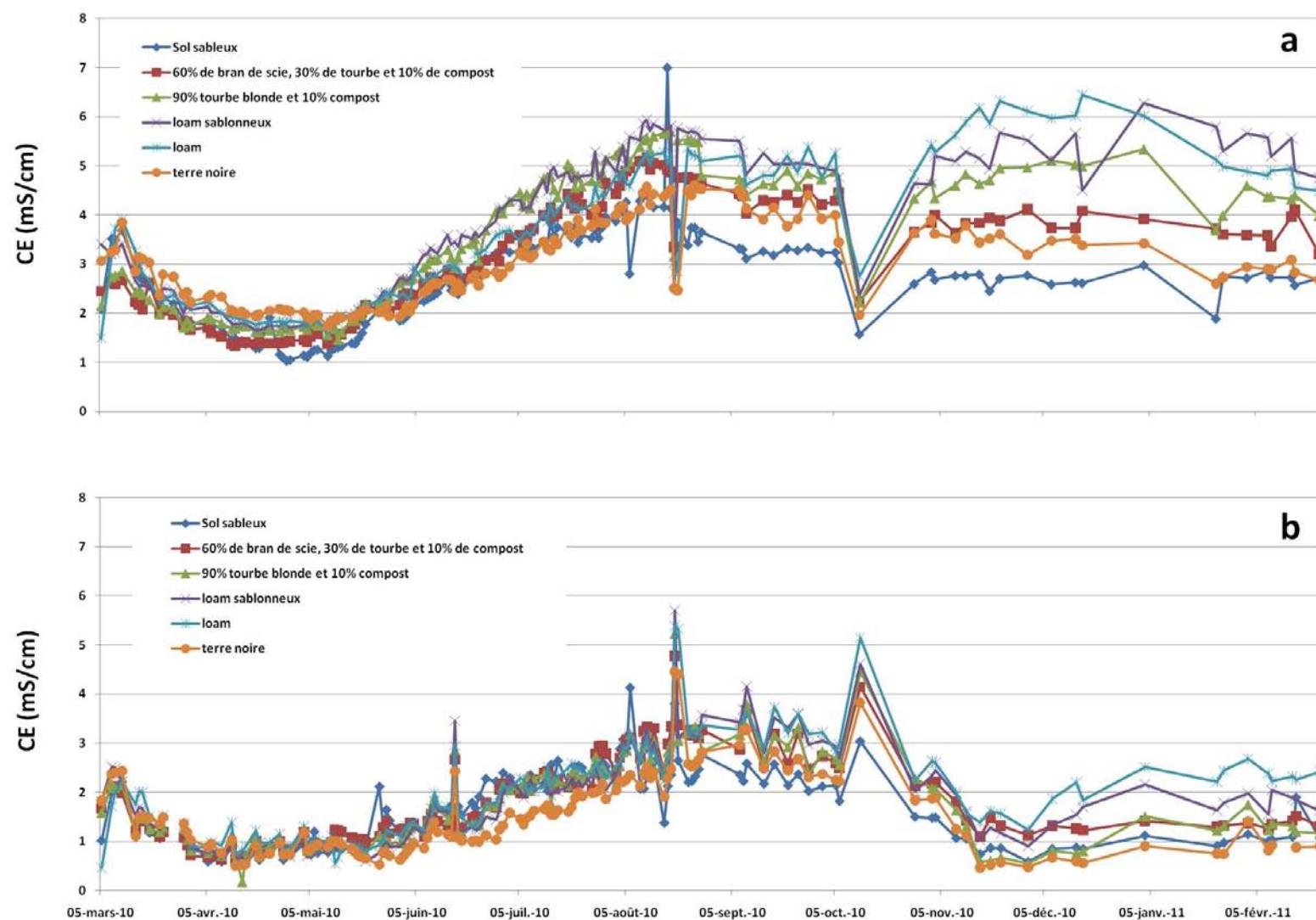


Figure 5. Conductivité électrique (CE) de la solution drainée (a) et de la solution recirculée pour l'arrosage de la culture (b) au cours de la production 2010. La CE a été mesurée sur un mélange des solutions drainées de six bacs contenant un même sol.

Concentration d'anions dans la solution du sol

Au cours de la culture 2010, la concentration des ions Cl^- dans la solution du sol a augmenté entre 2,4 (terre noire) et 3,8 (sol sableux) fois durant la production (tableau 1). La concentration de SO_4^{2-} était entre 5,0 (mélange de tourbe, sciure et compost) et 9,6 (terre noire) fois plus élevée au moment de la mise en fonction du système d'oxygénation comparativement à la concentration au début de la culture (tableau 1). L'augmentation en NO_3^- était variable entre les six sols. Une augmentation plus élevée a été observée dans le sol sableux (17,8x), dans le mélange de tourbe, sciure et compost (36,8x), le loam sablonneux (12,7x) et dans le mélange de tourbe et de compost (14,2x) (tableau 1). L'augmentation était moins prononcée dans les deux autres sols (5,2 et 7,2x). La concentration de PO_4^{2-} dans la solution du sol a diminué pendant la période de production

Tableau 1. Augmentation de la concentration en anions dans la solution du sol échantillonnée à l'aide de lysimètres jusqu'à la mise en fonction du système d'oxygénation.

	Augmentation des anions (x-fois) ¹			
	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^{2-}	NO_3^-
Sol sableux	3,8 ± 3,6	6,2 ± 3,5	0,4 ± 0,22	17,8 ± 14,1
Bran de scie, tourbe St-Laurent & compost	2,6 ± 1,8	5,0 ± 3,1	0,4 ± 0,27	36,8 ± 33,3
Tourbe blonde & compost	3,5 ± 0,8	5,5 ± 1,7	0,2 ± 0,04	14,2 ± 6,7
Loam sablonneux	3,4 ± 0,5	6,4 ± 3,1	0,5 ± 0,01	12,7 ± 3,9
Loam	3,2 ± 0,8	7,0 ± 1,4	0,7 ± 0,19	7,2 ± 1,4
Terre noire	2,4 ± 1,5	9,6 ± 4,7	0,8 ± 0,04	5,2 ± 3,6

¹L'augmentation de la concentration d'anions a été calculée avec la formule suivante: concentration moyenne de chaque anion pendant les 4 dernières semaines avant la mise en fonction du système d'oxygénation / concentration moyenne de chaque anion pendant les 4 premières semaines de la culture.

Tableau 2. Augmentation de la concentration en anions dans la solution du sol échantillonnée à l'aide de lysimètres suite à la mise en fonction du système d'oxygénation.

	Augmentation des anions (x-fois) ¹			
	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^{2-}	NO_3^-
Sol sableux/oxygéné	6,5 ± 6,0	10,0 ± 8,2	nd	9,4 ± nd
non oxygéné	1,9 ± nd ²	3,5 ± nd	nd	27,1 ± 17,8
Bran de scie, tourbe, compost/oxygéné	2,8 ± 0,7	2,6 ± 0,1	0,1 ± nd	71,0 ± 5,4
non oxygéné	0,9 ± nd	2,2 ± nd	0,7 ± nd	20,5 ± nd
Tourbe, compost/oxygéné	3,5 ± 0,9	6,6 ± 0,5	nd	7,8 ± 0,01
non oxygéné	4,2 ± 1,1	7,6 ± 2,8	0,3 ± 0,04	9,3 ± 6,1
Loam sablonneux/oxygéné	2,5 ± 0,6	3,3 ± 0,1	0,7 ± nd	8,8 ± 2,7
non oxygéné	4,3 ± nd	5,8 ± nd	nd	15,9 ± nd
Loam/oxygéné	4,7 ± 1,7	10,2 ± 2,7	nd	67,0 ± 2,8
non oxygéné	2,7 ± 1,3	5,3 ± 2,6	0,8 ± nd	5,5 ± 0,1
Terre noire/oxygéné	1,8 ± 0,9	5,1 ± 3,4	nd	3,3 ± 3,5
non oxygéné	2,0 ± 1,4	7,8 ± 4,7	1,2 ± nd	4,5 ± 2,5

¹L'augmentation de la concentration d'anions a été calculée avec la formule suivante: concentration moyenne de chaque anion pendant les 4 dernières semaines de la culture/ concentration moyenne de chaque anion pendant les 4 premières semaines de la culture suite à la mise en route du système d'oxygénation.

²nd : non déterminé

Lors du traitement d'oxygénation, la concentration des ions Cl^- dans la solution du sol a augmenté entre 1,8 (terre noire) et 6,5 (sol sableux) fois pour l'ensemble de la culture (tableau 2). Le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost non oxygéné est le seul

traitement où une diminution de la concentration en ion Cl^- a été observée (tableau 2). L'oxygénation a eu un effet opposé selon le sol : plus importante augmentation pour le sol sableux, le mélange de bran de scie, de tourbe et de compost ainsi que le loam alors qu'une moins importante augmentation a été observée pour le mélange de tourbe et compost, le loam sablonneux ainsi que la terre noire (tableau 2). Une tendance similaire a également été observée pour l'accumulation de SO_4^{2-} . Celle-ci était entre 2,2 (bran de scie, tourbe, compost/non oxygéné) et 10,2 (loam/oxygéné) fois plus élevé en fin de culture. Une grande variation a une fois de plus été observée au niveau de l'accumulation de NO_3^- en fin de culture (tableau 2). Les augmentations les plus prononcées ont été observées dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost oxygéné (71,0x) et le loam oxygéné (67,0x). L'accumulation la plus faible a été observée dans la terre noire oxygénée (3,3x) et non oxygénée (4,5x). L'oxygénation semble avoir augmenté considérablement la disponibilité en NO_3^- dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost ainsi que dans le loam (tableau 2). Toutefois, des essais supplémentaires sont nécessaires afin de confirmer cet effet et déterminer les causes possibles.

Flux de CO_2 à la surface du sol

La respiration du sol, en tant qu'indicateur de l'activité biologique du sol, a été mesurée à quatre reprises au cours de la période de culture 2009 et à neuf reprises au cours de la période de production 2010. La respiration du sol ainsi mesurée représente la respiration des microorganismes du sol et la respiration des racines des plants.

Lors de la première évaluation (juillet 2009), le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost montrait le plus fort taux de respiration. À cette date, le flux de CO_2 était, dans la majorité des cas, de deux à quatre fois plus élevé pour ce substrat comparativement aux autres (tableau 3). Le plus faible taux de respiration a été observé au niveau du sol sableux (tableau 3). Toutefois, aucune différence significative n'a été observée au niveau des deux systèmes d'irrigation ($P=0,6616$). À la seconde prise de mesures (août 2009), le taux de respiration du substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost était une fois de plus supérieur à celui observé chez les autres sols (tableau 3). Cette fois, la respiration pour le traitement d'irrigation 2/3 en profondeur et 1/3 à la surface était significativement plus élevée que pour l'irrigation en surface (tableau 3). Lors de la troisième évaluation (novembre 2009), les résultats obtenus n'ont pas montré de différence entre les traitements à l'exception du sol composé de bran de scie/tourbe/compost. Pour ce sol, le flux de CO_2 était significativement plus élevé dans les parcelles irriguées 2/3 en profondeur et 1/3 à la surface comparativement aux autres traitements (tableau 3). L'interaction des traitements de sol et d'irrigation était significative lors de l'évaluation de la respiration à la fin de la période de culture (décembre 2009). Toutefois, aucune conclusion définitive ne peut être tirée des résultats obtenus lors de cette évaluation.

Les flux de CO_2 à la surface du sol les plus élevés ont une fois de plus été observés au niveau du substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost lors des six premières évaluations de la période de production 2010 (tableau 4). La décomposition graduelle des matières contenues dans ce substrat (bran de scie et tourbe) au cours de la culture ainsi que l'apport en microorganismes provenant du compost initialement ajouté au mélange peut expliquer en partie cette plus forte respiration. Dans la majorité des cas, les taux de respiration les plus faibles ont été mesurés dans le loam ou dans le loam sablonneux pour l'ensemble des dates de mesure (tableau 4). Deux prises de mesure ont été effectuées suite à la mise en place du système d'oxygenation (février et mars 2011). Dans les deux cas, des taux de respiration du sol significativement plus élevés ont été mesurés dans les sols oxygénés comparativement aux sols non-oxygénés (tableau 4). L'apport en O_2 semble augmenter l'activité biologique dans les sols.

Tableau 3. Émission de CO₂ à la surface du sol au cours de la période de production 2009.

	Flux de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)			
	Juillet 2009	Août 2009	Novembre 2009	Décembre 2009
Sols				
Sol sableux	5,53a	8,91a		
Bran de scie (60%), tourbe St-Laurent (30%) et compost (10%)	14,79c	15,56b		
Tourbe blonde (90%) et compost (10%)	6,89b	10,15a		
Loam sablonneux	7,03b	8,67a		
Loam	6,04ab	9,68a		
Terre noire	9,76b	9,86a		
Irrigation				
Surface seulement		9,69a		
1/3 surface & 2/3 profondeur		11,25b		
Sols x Irrigation				
Sol sableux / Surface seulement			19,32a	21,14cd
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur			18,23a	14,80ab
Bran de scie (60%), tourbe St-Laurent (30%) et compost (10%)			20,15a	26,45e
/ Surface seulement			35,47b	28,12e
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur			24,71a	16,85abc
Tourbe blonde (90%) et compost (10%) / Surface seulement			17,64a	23,95de
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur			24,52a	19,03bcd
Loam sablonneux / Surface seulement			18,17a	14,47ab
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur			17,72a	15,23ab
Loam / Surface seulement			17,22a	18,04bc
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur			18,45a	12,07a
Terre noire / Surface seulement			19,82a	19,06bcd
/ 1/3 surface & 2/3 profondeur				
Valeur P				
<i>Sol</i>	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>Irrigation</i>	0,6616	0,0181	0,7829	0,0693
<i>Sol x Irrigation</i>	0,5297	0,5992	<0,0001	<0,0001

Pour chaque colonne, les valeurs suivies d'une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey (P≤0,05).

Tableau 4. Émission de CO₂ à la surface du sol au cours de la période de production 2010.

	Flux de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)								
	Mars 2010	Avril 2010	Juin 2010	Juillet 2010	Septembre 2010	Octobre 2010	Novembre 2010	Février 2011	Mars 2011
Sols									
Sol sableux	15,7ab	10,4a	42,7ab	12,1a	9,6bc	13,6ab	23,3c	12,0	10,0bc
Bran de scie, tourbe St-Laurent, compost	35,9d	22,8b	64,8c	20,6b	13,3d	20,5c	19,2b	14,6	11,6c
Tourbe blonde, compost	25,9c	14,3a	30,8a	15,1ab	10,7cd	14,1ab	17,2b	15,2	10,1c
Loam sablonneux	12,8a	8,7a	30,7a	12,0a	6,7a	14,9b	20,6bc	14,3	8,8ab
Loam	13,2a	7,2a	46,8b	9,7a	7,1ab	9,8a	13,1a	13,1	7,5a
Terre noire	23,2bc	9,0a	47,9b	13,1a	11,9cd	14,0ab	17,0ab	14,0	9,4abc
Oxygénation									
Oxygéné								15,9b	10,1b
Non-oxygéné								11,9a	9,1a
Valeur P									
<i>Sol</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,3913	0,0004
<i>Oxygénation</i>								<0,0001	0,0500
<i>Sol x Oxygénation</i>								0,2452	0,3412

Pour chaque colonne, les valeurs suivies d'une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($P \leq 0,05$).

Rendement en fruits

Dans le cadre de ces essais en serre, les données présentées sont représentatives du rendement obtenu par superficie de serre et prennent en considération la diminution de densité des plants résultant des évaluations de biomasse tout au long de la culture.

Pour la période de production 2009, les récoltes ont débuté le 29 juillet 2009 et se sont poursuivies jusqu'à la fin de la culture (fin décembre 2009). Les meilleurs rendements ont été observés avec la terre noire, sol naturellement fertile en début de culture comparativement aux autres sols testés (fig. 6). Le rendement cumulatif total en fruits était significativement plus bas pour les deux substrats à base de tourbe comparativement aux autres sols testés (fig. 6). Ce retard observé au niveau du rendement pour ces deux substrats peut être dû à une immobilisation de l'azote lors des premiers mois de culture en 2009, phénomène souvent observé dans les substrats à base de tourbe. Des symptômes de carence en azote ont, en effet, été observés chez les plants cultivés dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost. Une tendance similaire a également été observée pour le rendement cumulatif en fruits classés #1. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux systèmes d'irrigation testés au niveau du nombre total de fruits ($P=0,3563$) et du rendement total ($P=0,3277$).

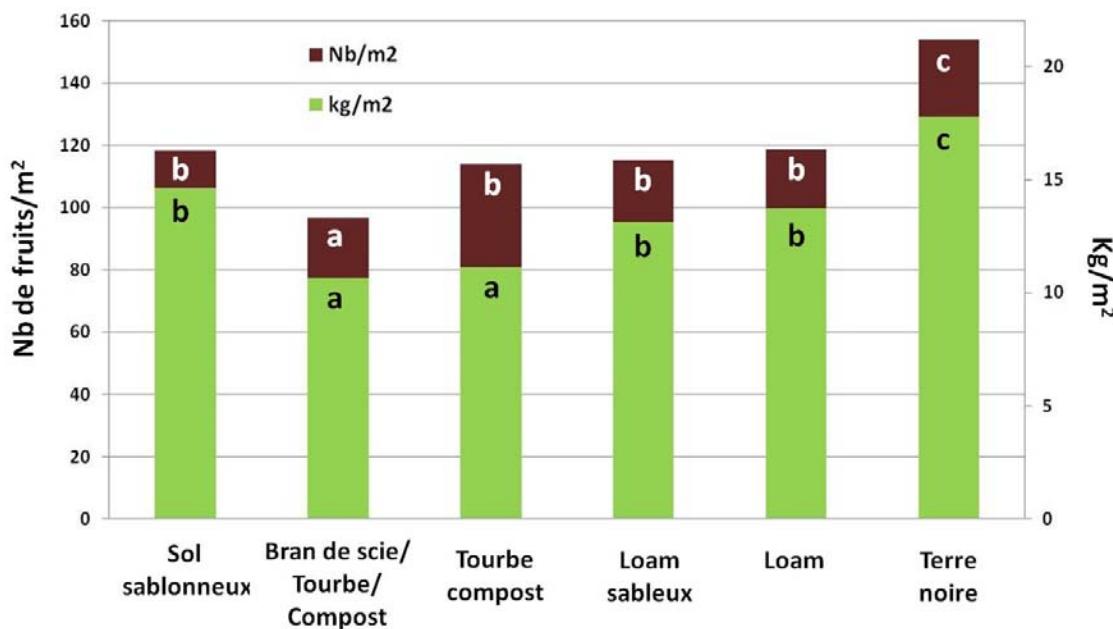


Figure 6. Rendement total en fruits obtenu pour les six sols testés lors de la culture 2009.

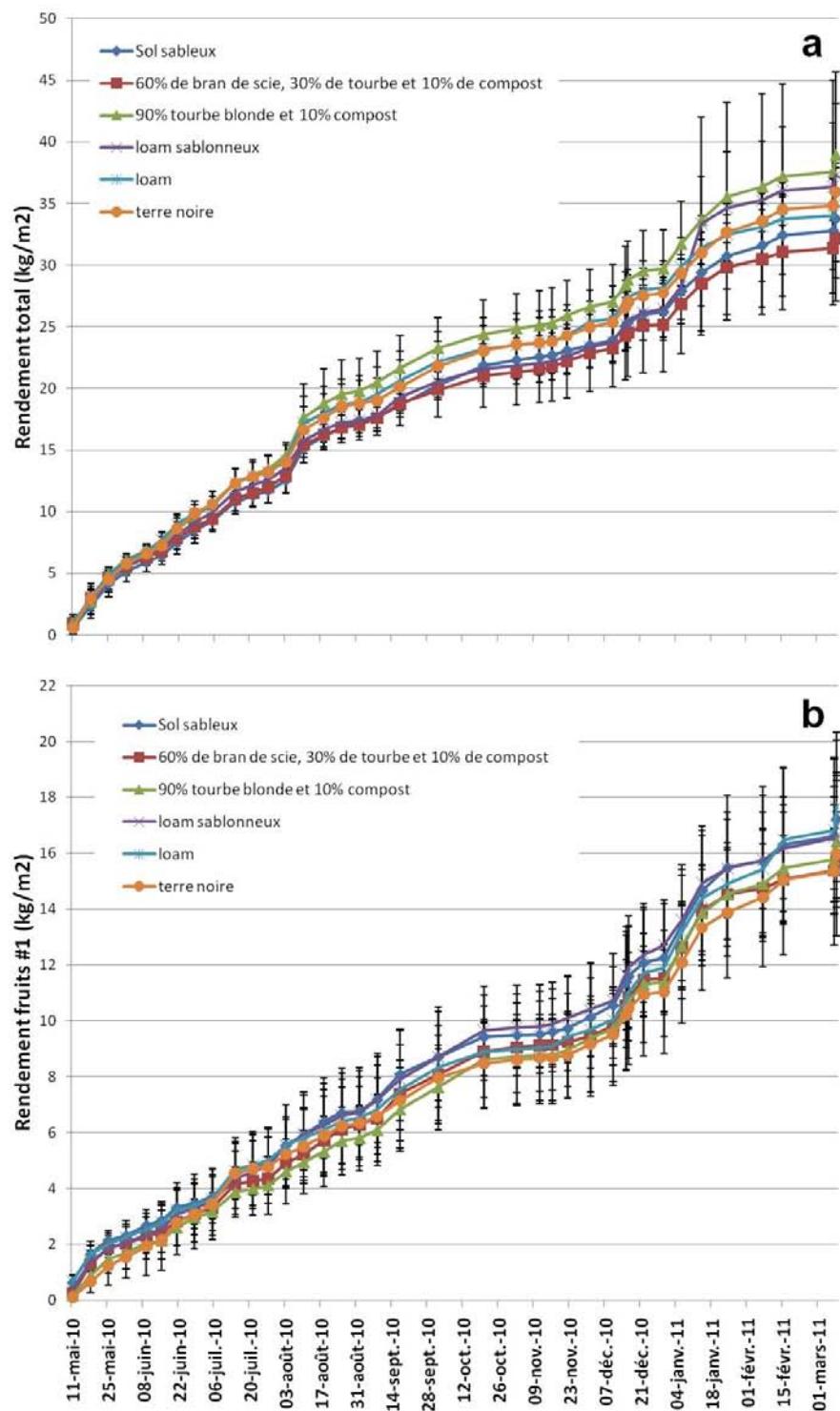


Figure 7. Rendement cumulatif en fruits total (a) et en fruits no 1 (b) pour les six sols testés lors de la période de production 2010.

Tableau 5. Rendement cumulatif en tomates jusqu'à la mise en place du système d'oxygénation pour la culture 2010.

	Rendement total Nb de fruit/m ²	Rendement fruits #1 Nb de fruit/m ²	Rendement fruits #1 Kg/m ²
Sols			
Sol sableux	158,8	25,3ab	54,7a
Bran de scie (60%), tourbe St-Laurent (30%), compost (10%)	163,5	24,5a	72,1b
Tourbe blonde (90%) et compost (10%)	175,8	28,8b	74,9b
Loam sablonneux	162,2	25,5ab	76,9b
Loam	170,2	27,4ab	81,2b
Terre noire	169,7	27,0ab	69,6b
Valeur P			
<i>Sol</i>	0,3968	0,0500	0,0002

Pour chaque colonne, les valeurs suivies d'une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($P \leq 0,05$).

Au cours de la période de production 2010, la récolte des fruits a débuté le 11 mai 2010 et a pris fin le 7 mars 2011. Le nombre total de fruits récoltés était similaire dans les six sols testés (tableau 5). Encore une fois, le rendement total le plus bas a été observé dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost. Le rendement total obtenu (kg/m^2) dans ce substrat était significativement plus bas que pour le substrat composé de tourbe blonde et de compost (tableau 5). Le rendement en fruits classés #1 (nb de fruits/ m^2 et kg/m^2) le plus bas a été observé dans le sol sableux alors qu'aucune différence n'a été observée entre les rendements obtenus dans les autres sols (tableau 5).

Le système d'oxygénation a été mis en fonction pour les deux derniers mois de culture. Durant cette période (16 décembre 2010 au 7 mars 2011), aucune différence significative n'a été observée entre les traitements au niveau du rendement total (tableau 6). Toutefois, le rendement en fruits classés #1 était significativement plus élevé ($0,8 \text{ kg}/\text{m}^2$) pour les sols non-oxygénés comparativement aux sols oxygénés (tableau 6). Or, étant donné la courte période de récolte, une bonne partie des fruits récoltés ont été formés alors que le système d'oxygénation n'était pas fonctionnel. Une conclusion définitive quant au rendement est par conséquent difficile à émettre.

Néanmoins, sur l'ensemble de la culture 2010, incluant les mois de récolte où les sols ont été oxygénés, aucune différence significative n'a été observée au niveau de l'effet de l'oxygénation des sols sur le nombre de fruits classés #1 ainsi que sur le rendement total et en fruits classés #1 (kg/m^2) (tableau 7). Toutefois, le nombre cumulatif de fruits récoltés était significativement plus élevé dans les sols non-oxygénés comparativement aux sols oxygénés (tableau 7). Les rendements cumulatifs les plus bas ont été observés dans le sol sableux, suivant ainsi la tendance observée pour la première partie de la culture (tableau 7).

Tableau 6. Rendement cumulatif en tomates pour la période où le système d'oxygénation était fonctionnel (16 décembre 2010 au 7 mars 2011).

	Rendement total Nb de fruit/m ²	Kg/m ²	Rendement fruits #1 Nb de fruit/m ²	Kg/m ²
Sols				
Sol sableux	56,9	8,4	31,9	5,3a
Bran de scie (60%), tourbe St-Laurent (30%), compost (10%)	50,9	7,6	30,8	5,0a
Tourbe blonde (90%) et compost (10%)	60,6	10,1	39,0	6,6b
Loam sablonneux	53,5	11,7	37,7	5,8ab
Loam	51,3	7,6	33,7	5,2a
Terre noire	57,9	8,9	34,9	5,6ab
Oxygénéation				
Oxygéné	53,0	9,2	32,3a	5,2a
Non-oxygéné	57,5	8,9	37,0b	6,0b
Valeur P				
<i>Sol</i>	0,4898	0,1505	0,2232	0,0114
<i>Oxygénéation</i>	0,1926	0,8130	0,0372	0,0024
<i>Sol x Oxygénéation</i>	0,4578	0,3056	0,4646	0,2706

Pour chaque colonne, les valeurs suivies d'une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($P \leq 0,05$).

Aucune différence significative n'a été observée au niveau de l'interaction sol x oxygénéation. Par conséquent, seuls les résultats pour les effets simples sont présentés

Tableau 7. Rendement cumulatif en tomates pour l'ensemble de la culture 2010 et incluant les mois où le système d'oxygénéation était fonctionnel (du 11 mai 2010 au 7 mars 2011).

	Rendement total Nb de fruit/m ²	Kg/m ²	Rendement fruits #1 Nb de fruit/m ²	Kg/m ²
Sols				
Sol sableux	215,7	33,7	86,7a	13,9a
Bran de scie (60%), tourbe St-Laurent (30%), compost (10%)	214,4	32,1	102,9ab	15,9ab
Tourbe blonde (90%) et compost (10%)	236,4	38,9	113,9b	18,4b
Loam sablonneux	215,7	37,3	114,6b	17,7b
Loam	221,5	34,9	115,0b	17,7b
Terre noire	227,6	35,9	104,6b	16,4b
Oxygénéation				
Oxygéné	214,4a	35,0	103,7	16,2
Non-oxygéné	229,5b	35,9	108,8	17,1
Valeur P				
<i>Sol</i>	0,4136	0,1101	0,0028	0,0004
<i>Oxygénéation</i>	0,0396	0,4992	0,2132	0,0928
<i>Sol x Oxygénéation</i>	0,6528	0,7107	0,1751	0,1078

Pour chaque colonne, les valeurs suivies d'une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($P \leq 0,05$).

Aucune différence significative n'a été observée au niveau de l'interaction sol x oxygénéation. Par conséquent, seuls les résultats pour les effets simples sont présentés.

Qualité des fruits

Les qualités organo-leptiques des fruits ont été mesurées à la fin de la période de culture 2009 (mi-décembre 2009). Aucune différence significative entre les traitements n'a été observée pour le pourcentage de matière sèche et la quantité de sucres solubles contenus dans les fruits (figure 8c, d). Par contre, la concentration en lycopène contenue dans les fruits cultivés dans le loam arrosé en profondeur (26,2 mg/kg) était significativement plus basse que pour les fruits cultivés dans la terre noire arrosée en profondeur (46,9 mg/kg) ($P_{sol*irrigation} < 0,0001$; fig. 8a). Des teneurs en lycopène similaires ont été mesurées chez les fruits provenant des autres sols (fig. 8a). Des différences significatives ont également été observées au niveau de la capacité antioxidant. Une valeur plus élevée a été mesurée chez les fruits provenant du mélange de tourbe blonde et de compost irrigué en profondeur (18,8%), ce qui était significativement plus élevé que pour les fruits provenant de la terre noire irriguée en surface, pour qui la capacité antioxidant était la moins élevée (10,5%) (fig. 8b).

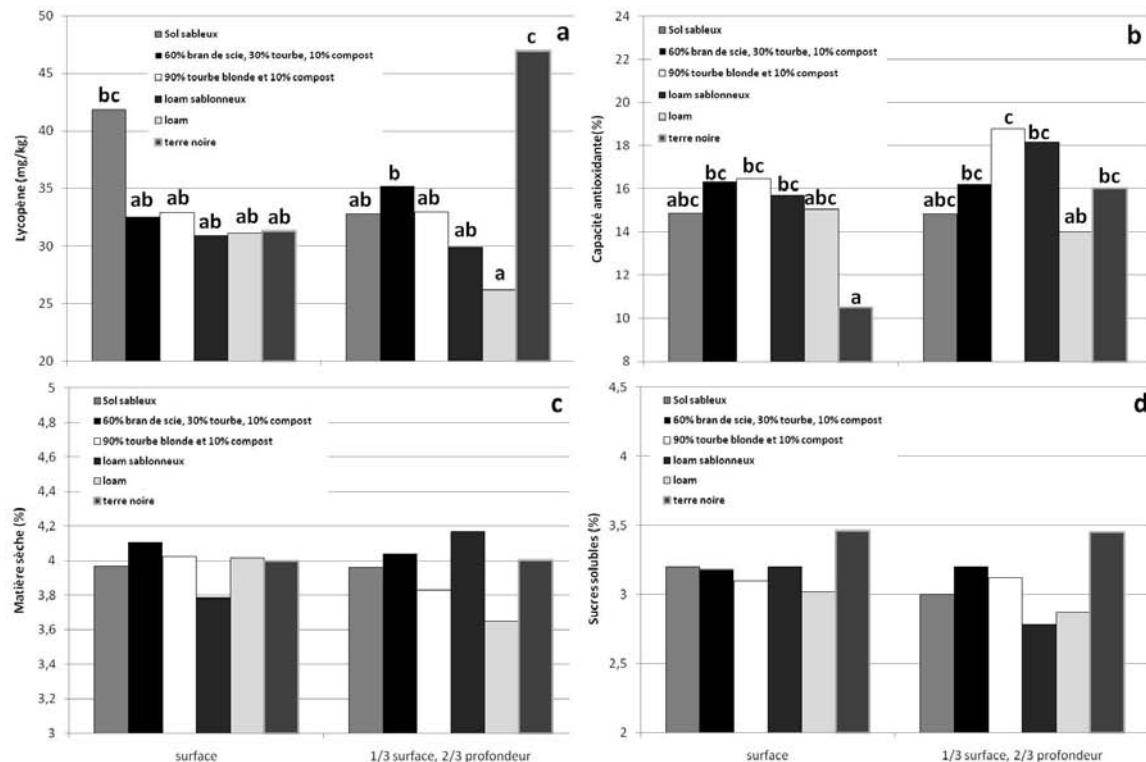


Figure 8. Contenu en lycopène (a), capacité antioxidant (b), pourcentage de matière sèche (c) et sucres solubles (d) des fruits lors de l'échantillonnage en décembre 2009.

Lors du premier échantillonnage (juin 2010), l'évaluation de la qualité des fruits provenant de la terre noire n'a malheureusement pas pu être effectuée en raison du nombre restreint d'échantillons disponibles. Toutefois, lors des échantillonnages subséquents, une analyse complète de tous les traitements a pu être effectuée. Lors des cinq évaluations de la qualité organo-leptique des fruits de la culture 2010, l'effet multiple sol*oxygénéation n'était pas significatif pour aucun des paramètres évalués. En général, des différences significatives ont été observées au niveau de l'effet du sol dans lequel les plants ont été cultivés. Toutefois, ces différences sont très

variables d'un échantillonnage à l'autre, rendant difficile l'émission de conclusions au sujet de l'effet réel du type de sol sur la qualité des fruits. Des tendances générales ont néanmoins été observées. Ainsi, les fruits cultivés dans la terre noire démontrent de basses valeurs pour la capacité antioxidant et l'acidité titrable en comparaison avec les autres sols testés (figure 9b, c).

De plus, pour l'ensemble des sols testés, le contenu en lycopènes était plus élevé lors des deux derniers échantillonnages (figure 9a). Lors de l'évaluation du mois de février, les fruits provenant des sols oxygénés contenaient significativement plus de lycopène (68,3 mg/kg) comparativement aux fruits provenant des sols non oxygénés (64,7 mg/kg) ($P=0,0172$). Ces résultats semblent montrer que la concentration en lycopène dans les tomates produites en contenant peut être augmentée en oxygénant le sol ou le substrat dans lequel ces dernières sont cultivées. Par contre, étant donné la courte période durant laquelle le sol fut oxygéné au cours de cette étude, des essais sur une année complète de culture sont nécessaires afin de confirmer la tendance observée. La conductivité électrique lors du même échantillonnage était également plus élevée pour les fruits provenant des sols oxygénés (4,7 mS/cm) comparativement aux fruits provenant des sols non oxygénés (4,3 mS/cm) ($P=0,0499$; données non présentées).

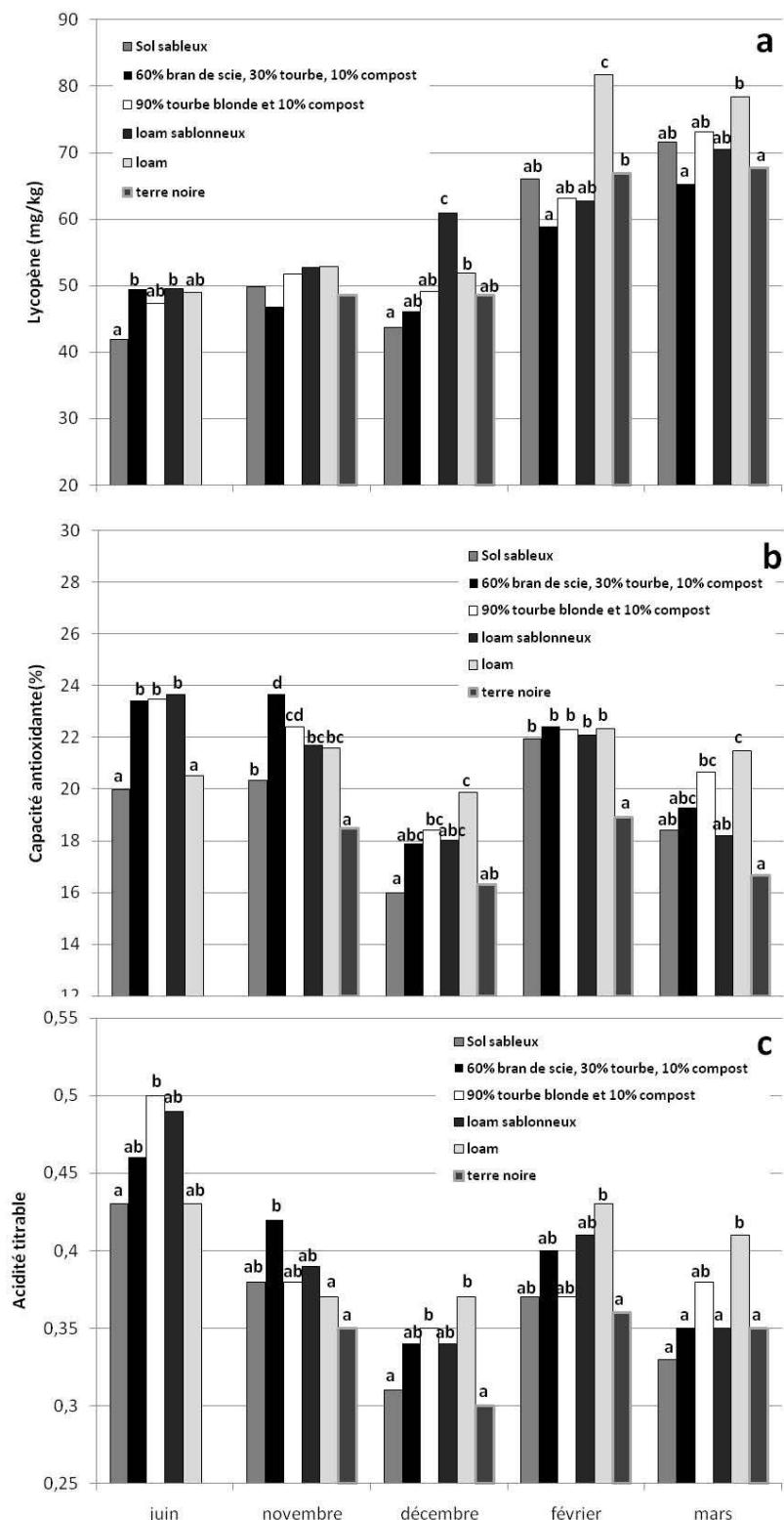


Figure 9. Contenu en lycopène (a), la capacité antioxidantante (b) et l'acidité titrable (c) des fruits lors de cinq échantillonnages au cours de la culture 2010.

Biomasse destructive

La croissance des plants, évaluée en octobre 2009, était moindre lorsque ceux-ci ont reçu une irrigation en profondeur (fig. 10a). Toutefois, cet effet s'est estompé et aucune différence significative n'a pu être observée lors de la deuxième évaluation (fig. 10a). Le type d'irrigation n'a eu aucun effet sur le pourcentage de matière sèche de la tige au cours de la culture 2009 (fig. 10b). Un retard de croissance chez les plants cultivés dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost a pu être observé au niveau de la longueur des tiges (fig. 10c). À chacune des évaluations, la longueur des tiges des plants cultivés dans ce substrat était significativement plus courte que pour les plants cultivés dans les autres sols ne contenant pas de tourbe (fig. 10c). La longueur de la tige la plus importante a été observée chez les plants de tomate cultivés dans la terre noire (fig. 10c). Ces résultats suivent la même tendance que les résultats obtenus pour le rendement en fruits. Le pourcentage de masse sèche de la tige des plants cultivés dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost était significativement plus élevé lors de l'évaluation du mois d'octobre que pour les autres sol à l'exception du loam (fig. 10d). Cette différence n'était, par contre, plus observée lors de la deuxième évaluation.

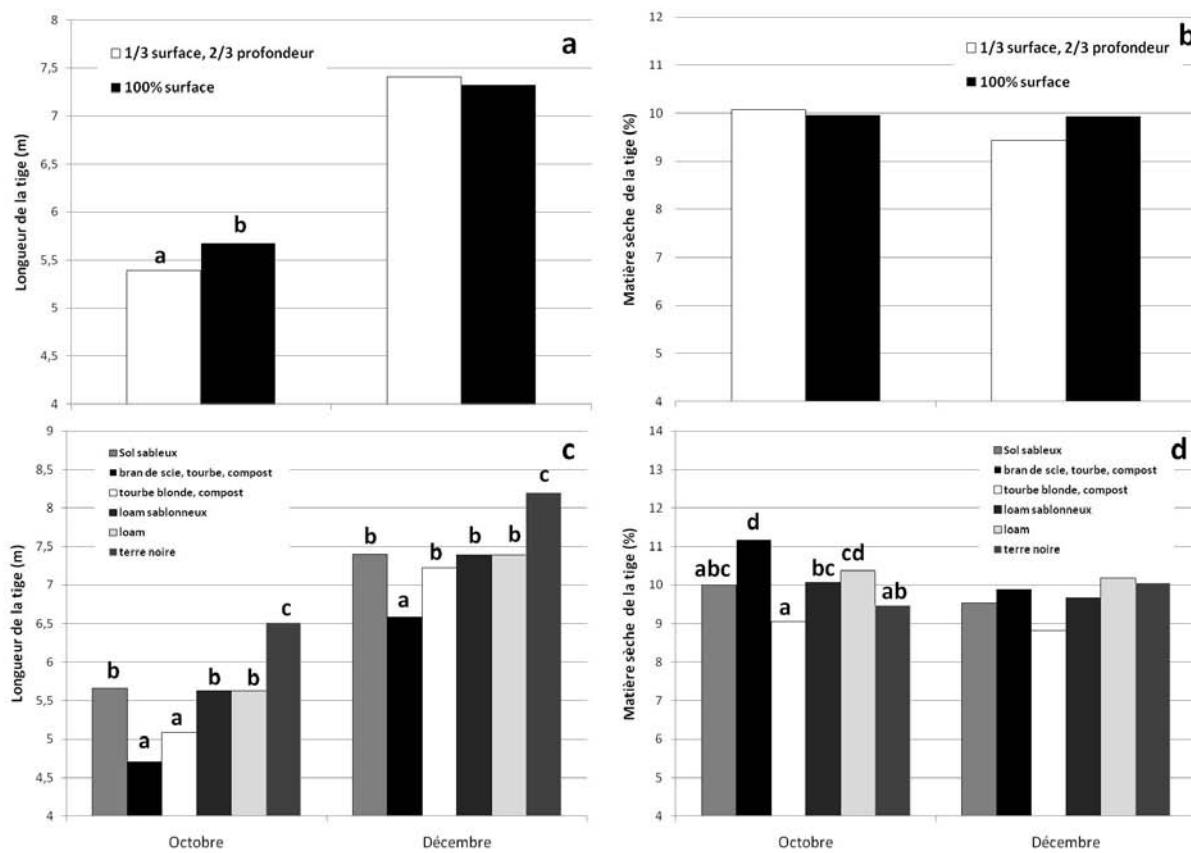


Figure 10. Effet du type d'irrigation et du sol sur la biomasse des tiges des plants de tomate lors de la période de culture 2009 (a et c: longueur de la tige; b et d : % de masse sèche de la tige).

Lors de l'évaluation du mois d'octobre 2009, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements (irrigation et sol) pour l'accumulation de masse sèche par unité de surface foliaire (fig. 11a, c). Le type de système d'irrigation utilisé n'a également eu aucun effet sur le pourcentage de masse sèche dans les feuilles (fig. 11b). Le pourcentage de matière sèche dans les feuilles des plants cultivés dans le substrat composé de bran de scie, de tourbe et de compost était significativement plus élevé que pour les plants cultivés dans le loam sablonneux sans toutefois être différent des valeurs observées pour les autres sols (fig. 11d). Les résultats de la deuxième évaluation effectuée au mois de décembre 2009 montrent que l'accumulation de biomasse sèche par unité de surface foliaire était significativement plus élevée pour les plants ayant reçu une irrigation à la surface du sol uniquement (fig. 11a). Le pourcentage de matière sèche dans les feuilles des plants cultivés dans le substrat composé de tourbe blonde et de compost était significativement plus bas que pour les plants cultivés dans la terre noire sans toutefois être différent des valeurs observées pour les autres sols (fig. 11d).

Ces résultats indiquent qu'aucun sol ne s'est vraiment démarqué quant à l'accumulation de biomasse dans la tige et dans les feuilles sur l'ensemble de la culture en 2009. Les conséquences des retards de croissance ayant été observés en début de culture, principalement dans les substrats contenant de la tourbe, sont demeurées visibles même en fin de culture au niveau de la taille des plants et des rendements cumulatifs. Toutefois, le développement des plants semble avoir été similaire pour tous les traitements lors des derniers mois de culture (octobre à décembre 2009), comme le démontre l'accumulation de biomasse sèche dans la tige et les feuilles.

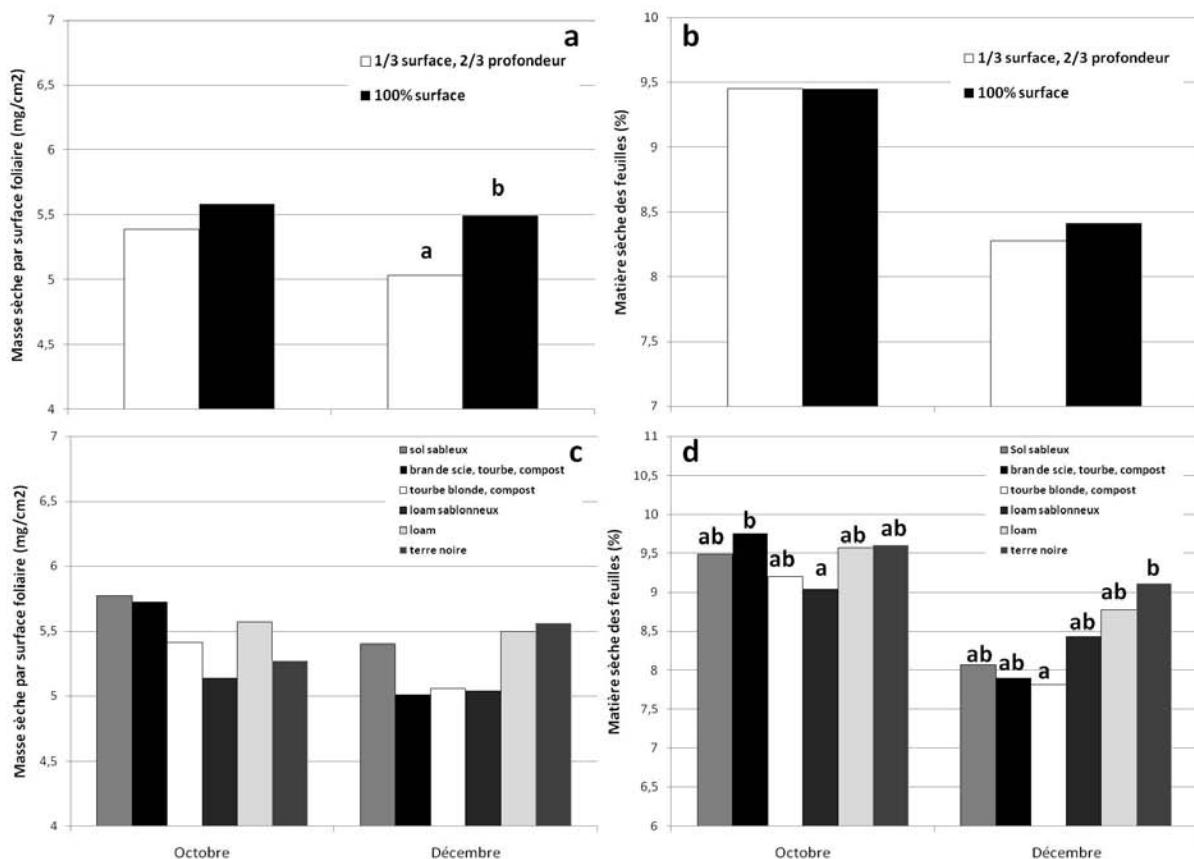


Figure 11. Effet du type d'irrigation et du sol sur la biomasse des feuilles des plants de tomate lors de la période de culture 2009 (a et c: accumulation de masse sèche par unité de surface foliaire; b et d : % de matière sèche des feuilles).

Aucune différence significative n'a été observée au niveau de la biomasse des feuilles et de la tige lors de la première évaluation de biomasse au mois de mai 2010 (fig. 12). Bien que des différences significatives aient été observées entre les sols, aucune tendance marquée n'a pu être définie tout au long de la culture 2010. De plus, l'oxygénéation du substrat n'a eu aucun effet significatif sur l'accumulation de masse sèche par unité de surface ($P=0,0744$ et $0,8419$ pour janvier et mars 2011, respectivement), le pourcentage de masse sèche des feuilles ($P=0,0595$ et $0,7056$ pour janvier et mars 2011, respectivement), la longueur de la tige ($P=0,5805$ et $0,1179$ pour janvier et mars 2011, respectivement) et le pourcentage de masse sèche de la tige ($P=0,6453$ et $0,7875$ pour janvier et mars 2011, respectivement).

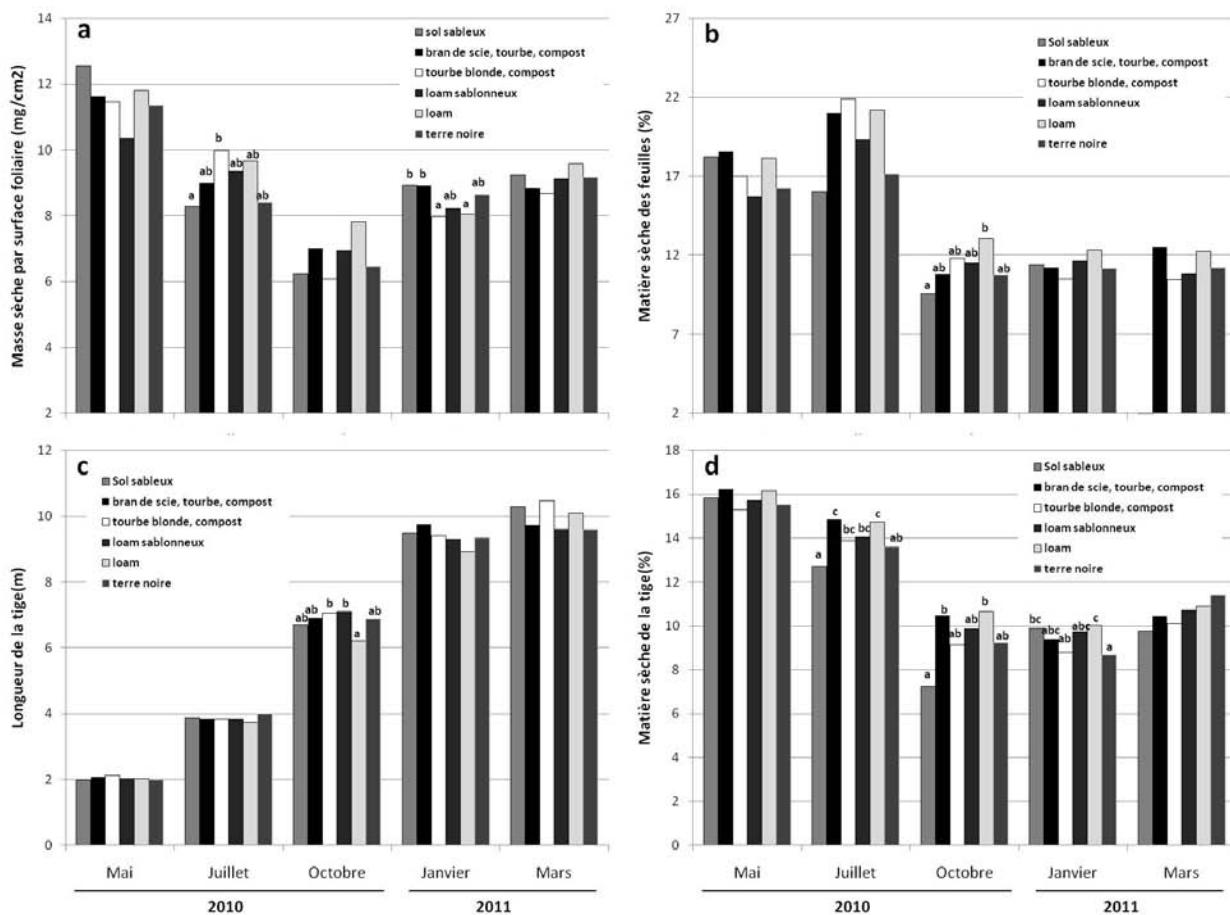


Figure 12. Effet de l'oxygénéation et du type sol sur la biomasse des feuilles et de la tige des plants de tomate lors de la période de culture 2010 (a : accumulation de masse sèche par unité de surface foliaire; b : % de matière sèche des feuilles; c : longueur de la tige; d : % de matière sèche de la tige).

Discussion et biens livrés

Des travaux précédents ont permis de démontrer une relation négative entre le contenu en eau du sol et l'activité biologique du sol, exprimée en flux de CO₂, sous des conditions commerciales d'irrigation basée sur la radiation solaire (Youch, 2008). Ces résultats suggèrent que sous une régie d'irrigation commerciale basée uniquement sur la radiation solaire, une large part d'éléments nutritifs peut être lessivée et ainsi être non disponible pour la plante. Des travaux précédents ont permis d'établir, pour un type de sol (sol Serres Jardins-Nature), une zone optimale de confort hydrique basée sur les paramètres physiologiques de la plante et l'activité biologique du sol (Pepin et al., 2008). Ce même principe a été appliqué aux cinq autres sols étudiés dans le cadre de ce projet. Les travaux effectués ont permis de mieux comprendre l'effet de l'irrigation et de la fertilisation sur la culture de tomates biologiques en bacs dans des sols étudiés possédant des caractéristiques physiques différentes.

À notre connaissance, peu de travaux ont porté sur l'effet de la régie d'irrigation et de fertilisation dans des sols biologiques pour la culture de la tomate de serre en contenants avec recirculation des effluents de culture. Ce projet visait donc à répondre à ce manque de connaissances et a permis de caractériser la charge polluante des effluents de culture en fonction de différents types de sol, de différentes régies d'irrigation et de fertilisation ainsi que les risques associés à la recirculation des effluents sans utilisation de désinfection. La deuxième année du projet a également permis d'étudier ces paramètres en présence d'un apport en O₂ au sol.

Les résultats obtenus au cours de la première année de ce projet ont démontré qu'une irrigation en profondeur n'a eu aucun effet sur le rendement et sur la qualité des fruits comparativement à une irrigation en surface. L'effet de l'irrigation était de plus limité au niveau de l'activité biologique du sol (plus élevé pour l'irrigation en profondeur en août 2009 seulement) et de la biomasse des plants. Le contrôle de l'irrigation par tensiomètres installés à une profondeur de 15 cm (même profondeur que l'irrigation) assurait une uniformité au niveau de la disponibilité en eau au niveau des racines. Toutefois, des différences marquées entre les sols testés ont été observées dès la première année. Le substrat composé de bran de scie, tourbe et de compost a montré la plus forte activité biologique comparativement aux autres sols. Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, celle-ci n'était pas associée à un rendement et une accumulation de biomasse plus importants. Les rendements dans ce substrat ont été les plus bas observés lors de la première année. Une tendance similaire, bien que moins marquée, a également été observée pour le substrat composé de tourbe blonde et de compost. Ces résultats montrent qu'un nouveau substrat à base de tourbe, utilisé pour une première culture de tomate en production biologique, représente un milieu actif au niveau biologique (respiration) mais qui n'est pas totalement adéquat, du point de vue de la disponibilité en éléments nutritifs, pour les plants de tomate. La régie de fertilisation a été ajustée de façon à maintenir une CE moyenne de la solution du sol supérieure à 1,5 mS cm⁻¹. Bien que cette CE ait été validée pour une culture biologique de tomate en bacs continus et a permis l'atteinte de rendement similaire à une culture conventionnelle en conditions commerciales (PPFI 2009), des carences au niveau des plants ont été observées chez les plants cultivés dans les substrats de tourbe.

Des travaux récents ont démontré un effet positif de l'enrichissement du sol en oxygène pour une culture de tomate biologique en plein sol (PSDAB 2009, Serres Jardins-Nature, New Richmond). Ce principe a donc été appliqué dans le cadre de la culture 2010. Le traitement irrigation testé lors de la première année du projet a été remplacé pour un traitement d'oxygénéation du sol (parcelle principale du dispositif expérimental). Un système de distribution d'oxygène a été mis en fonction en fin de culture. L'oxygénéation a augmenté l'activité biologique de façon générale dans tous les sols testés. Toutefois, aucun effet bénéfique de l'oxygénéation n'a été observé au niveau du rendement en fruits ou de l'accumulation de la biomasse des plants de tomate. La maturité des plants (fin du cycle de culture) lors de la mise en fonction du système d'oxygénéation est un

aspect à considérer pour expliquer ces résultats. En effet, les essais d'oxygénation ont été effectués en hiver alors que les plants sont naturellement moins actifs en raison de la luminosité réduite. Le nombre élevé de traitements testés (12 au total) dans le cadre de ces essais ont de plus limité la puissance des analyses statistiques en raison de nombre restreint de répétitions (3 répétitions pour chaque combinaison sol*irrigation en 2009 et sol*oxygénation en 2010).

En résumé, ce projet a permis de :

1. Démontrer qu'une irrigation ciblée au niveau des racines, lorsque contrôlée par la tension matricielle dans le sol, avait peu d'impact sur le développement des plants de tomate cultivés sous régie biologique;
2. Démontrer une accumulation importante de Cl^- et de SO_4^{2-} dans la solution du sol suite à la recirculation de la solution drainée;
3. Démontrer que l'oxygénation, dans certains types de sol, augmente la disponibilité en NO_3^- ;
4. Démontrer que l'oxygénation augmente l'activité biologique dans des sols ayant différentes caractéristiques physiques;
5. Démontrer un effet négatif de l'oxygénation, en fin de culture, sur le rendement en fruits de plants de tomate cultivés sous régie biologique;
6. Démontrer un effet bénéfique suite à la mise en fonction du système d'oxygénation sur le contenu en lycopène des fruits.

Des travaux devraient être effectués afin de vérifier l'effet de l'oxygénation sur une année complète de culture. Le système d'oxygénation utilisé dans le cadre de cet essai devrait également être modifié afin d'optimiser la distribution de l' O_2 dans chacun des sols au niveau du système racinaire des plants de tomate. De plus, des essais visant à évaluer le développement racinaire spécifique à chaque sol devraient être envisagés.

Des résultats préliminaires de ces travaux ont été présentés dans le cadre du Congrès International d'Horticulture tenu à Lisbonne en août 2010 ainsi qu'au premier symposium sur la recherche en horticulture biologique en serre qui s'est tenu à Bleiswijk du 11 au 14 octobre 2010. Les travaux ont également été présentés au Forum sur la recherche et l'innovation en serriculture qui s'est tenu le 28 octobre 2010 au Centre de recherche en horticulture (CRH) de l'Université Laval. Un article scientifique est de plus en préparation.

Difficultés rencontrées

Des changements considérables ont été apportés aux objectifs du projet entre la période de culture 2009 et 2010. Le traitement « irrigation » a été remplacé par un traitement « oxygénation ». Ainsi, le système d'irrigation a été changé afin de permettre l'installation de gicleurs sur l'ensemble des parcelles expérimentales. Il était donc important de déterminer si le nouveau système d'irrigation était adéquat pour l'ensemble des sols testés et c'est pourquoi l'oxygenation n'a pas été démarrée dès le début de la culture. L'installation et la mise en fonction du système d'oxygenation a également nécessité plus temps que prévu à l'origine. L'oxygenation des sols a donc été faite pour les deux derniers mois de la culture 2010.

Les travaux décrits pour ce projet ont été effectués dans un compartiment du complexe de « Serres haute performance » à l'Université Laval. Ce nouveau complexe de serres était en période de rodage lors de la mise en place de la culture 2009 ce qui a entraîné des ajustements

constants au niveau des paramètres du climat au cours des premiers mois de culture. Une meilleure compréhension du système de gestion du climat a permis d'améliorer un meilleur maintien des conditions climatiques et ainsi assurer un développement plus adéquat de la culture en 2010. Néanmoins, il est important de noter que ces essais ont été effectués sous des conditions expérimentales, ce qui peut affecter le développement de la culture. De plus, le cultivar utilisé en 2009 (Clarence greffé sur Beaufort) n'est que très rarement utilisé en culture biologique. Le suivi du développement de la culture semble indiquer que l'utilisation d'un cultivar mieux adapté aux conditions de culture biologique en sol serait plus approprié. Ainsi, un cultivar différent (Trust) a été utilisé pour la culture 2010.

Des problèmes sanitaires ont également été observés au cours des deux cycles de production. Des traitements au soufre microfin ont été effectués à cinq reprises en 2009 afin d'enrayer le développement du blanc (*Erysiphe orontii*). Au cours de la culture 2010, quatre traitements au soufre microfin et neuf traitements au Milstop ont été effectués afin de limiter les dommages causés par cette maladie. Les sols biologiques utilisés dans le cadre de ce projet sont propices au développement de sciarides. Tout au long de ce projet, des traitements de lutte biologique préventifs basés sur l'utilisation de nématodes (Vectobac) a permis de contrôler de façon adéquate les populations. Deux traitements préventifs avec du Rootshield ont également été effectués au cours de la culture 2010.

Un dépistage hebdomadaire des insectes ravageurs a été effectué tout au long du projet et une stratégie de lutte biologique préventive (introduction d'*Encarsia formosa* et *Hypoaspis aculeifer*) a été mise en place dès le début. En fin de culture 2009 (novembre à décembre), une infestation des plants par des aleurodes de serre (*Trialeurodes vaporariorum*) s'est développée de façon importante malgré l'utilisation d'insectes prédateurs en lutte biologique. Étant donné que l'infestation s'est développée en fin de culture, son effet semble avoir été minime sur le développement des plants. Un bon contrôle des populations d'insectes ravageurs a été maintenu tout au long de la culture 2010.

Lors de la culture 2009, bien que de façon limitée, un problème de colmatage de certaines lignes d'irrigation a été observé à quelques reprises dû au développement de biofilms à l'intérieur des tuyaux. Le nettoyage des tuyaux d'irrigation ainsi que des goutteurs était difficile sans affecter le niveau d'irrigation dans les bacs. Ce problème fut en partie réglé pour la culture 2010 par l'utilisation du nouveau système d'irrigation avec gicleurs. Un rinçage a été effectué à toutes les semaines assurant ainsi une plus grande uniformité au niveau de l'irrigation dans les bacs.

Annexe 1.

Nutrient availability and greenhouse tomato plant development under organic growing conditions: a case study of six organic soils.

Fertilisation in greenhouse organic tomato production relies on solid amendments and on the mineralization rate of nutrients. Nutrient availability is therefore often a problem as it is not coordinated with plant needs. The objective of the present experiment was to evaluate the nutrient, especially nitrogen, availability in six organic soils under organic greenhouse tomato production under recirculating conditions. The experimental set-up, conducted at Université Laval (Québec City, Canada), consisted of 36 experimental units (1.5 m^3 containers). The organic soils used were: 1) loam, 2) sandy loam, 3) sandy soil, 4) muck soil, 5) reconstituted organic soil with 40% air porosity and 6) peat soil amended with sawdust. Ten grafted tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) were cultivated in each growing container from February to December 2009. The crop was fertilized using certified organic compost, crab meal and seaweed extract. Irrigation was regulated for each soil according to the measured matric potential. Effluents, irrigation solution and soil solution are continuously collected and analyzed. Soil CO_2 effluxes, as an indicator of the soil biological activity, were evaluated every month. Plant biomass accumulation and fruit yield were evaluated throughout the production period. Results obtained in the different soils were compared.

Résumé et article (Acta Horticulturea) présenté au premier symposium sur la recherche en horticulture biologique en serre tenu à Bleiswijk, Pays-bas en octobre 2010.

Annexe 2.**Optimizing irrigation and fertilization for soils used in organic greenhouse tomato production**

Closed greenhouse growing systems offer several advantages from an environmental point of view. This is especially relevant in organic tomato productions where the release of nutrients through leaching is becoming highly regulated. The objective of this experiment was to evaluate the potential of six organic soils for the production of greenhouse tomato under recirculation conditions. The experiment was conducted at Université Laval (Québec City, Canada). The set-up consisted of 36 experimental units (growing containers of 1.5 m³ with a 0.8 m depth where effluents are continuously monitored and collected). The organic soils are described as the following: 1) loam, 2) sandy loam, 3) sandy soil, 4) muck soil, 5) reconstituted organic soil with 40% air porosity and 6) peat soil amended with sawdust. Ten grafted tomato plants (cv Clarence grafted on cv Beaufort) were cultivated in each growing container from May to December 2009. The crop was fertilized using certified organic compost, crab meal and seaweed extract as needed. Irrigation was optimized for each soil based on the matric potential measured at 15 cm using tensiometers. Soil and soil solution nutrient contents as well as microbial activity (FDA) were evaluated throughout the experiment. The reconstituted organic soil (5) showed the most fluctuation in microbial activity compared to other soils. Soil respiration (CO₂ effluxes), as an indicator of the soil biological activity, was evaluated three times during the growing season. Results from this experiment also showed that the highest yield was observed with the muck soil. Conclusions drawn from this experiment will allow an optimization of specific irrigation and fertilization conditions for each of the organic soils tested.

Résumé présenté dans le cadre du Congrès International d'Horticulture tenu à Lisbonne (Portugal) en août 2010.